

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420074

研究課題名(和文)単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具によるセラミックスの超精密切削

研究課題名(英文)Ultraprecision cutting of ceramics by micro milling tool of single crystal diamond

研究代表者

鈴木 浩文 (SUZUKI, Hirofumi)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20282098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：DVD、デジタルカメラ等の情報電子デバイス、マイクロカプセル等の医療用マイクロデバイスにおいて、非球面ガラスレンズの微小化、微細化、高精度化が強く要求されており、ガラス成形に対する高温耐熱性のあるセラミックス型の超精密・微細加工が重要な課題となっている。従来のマイクロ・ダイヤモンドホイール(砥石)による超精密研削加工では、工具摩耗等のため加工精度と能率に限界が生じていた。そこで本研究では、レーザ加工による単結晶ダイヤモンドの微細加工技術を開発し、マイクロフライス工具を試作し、工具摩耗が非常に小さいことを示し、硬質脆性材料であるセラミックスに対して鏡面切削の実現が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Micro aspheric glass lenses have been used in various devices, such as digital cameras, laser devices and medical devices. In order to machine micro aspheric ceramic molds precisely and efficiently, micro milling tools made of single crystalline diamond (SCD) are developed. Many cutting edges are fabricated 3-dimensionally on the edge of a cylindrical SCD by a laser beam. Flat binderless tungsten carbide mold was cut with the developed tool to evaluate the tool wear rate and its life. Some micro aspheric molds of tungsten carbide were cut with the tool at a rotational speed of 50,000 min<sup>-1</sup>. The molds were cut in the ductile mode. The form accuracy obtained was about 100 nm P-V and the surface roughness 12 nm Rz.

研究分野：精密加工学

キーワード：単結晶ダイヤモンド レーザ加工 セラミック 超精密切削 超硬合金 非球面金型 マイクロフライス工具 延性モード切削

## 1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルカメラ等のデジタルデバイス、体内検査用のマイクロカプセル等の医療デバイス、ブルーレーザなどのDVDデバイスにおいてマイクロ非球面レンズの微小化、高精度化のニーズが急激に増大している。

これまで本報告者らはマイクロ非球面の超精密研削・切削加工システムを開発し、マイクロデバイス用ガラスレンズを成形するためのセラミックス製成型の精密加工への適用を行ってきた。その結果、世界最小クラスのマイクロ非球面形状の超硬合金型の精密加工を、ダイヤモンド砥石による研削加工法により実現でき、 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{mP-V}$ の形状精度と、 $10 \sim 30\text{nmRy}$ の表面粗さが得た。また、近年、(i)ブルーレーザDVDなどの電子デバイス、(ii)デジタルカメラなどのデジタルデバイス、(iii)体内検査用マイクロカプセル等の医療デバイスなどにおいて、素子のガラス化、マイクロ(微小)化、高精度化のニーズが急激に増大している。ガラス材料を成形するためにはセラミック型による高温( $400 \sim 800$ )プレス成形プロセスが必要であり、それを実施するためには「セラミックス製の型の超精密加工」が不可欠であり、キーテクノロジーとなっている。

従来のセラミックの超精密加工には、マイクロ・ダイヤモンドホイール(砥石)により行われてきた。本提案者らはマイクロ非球面の超精密研削・切削加工システムを開発し、マイクロデバイス用ガラスレンズを成形するためのセラミックス製成型の精密加工への適用を行ってきた。提案者が開発した光通信や光ピックアップ用マイクロレンズ成型型を超精密に研削加工するためのマイクロ斜軸研削方法および装置により世界最小クラスのマイクロ非球面形状の超硬合金型の精密加工を、ダイヤモンド砥石による研削加工法により実現した。そして、 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{mP-V}$ の形状精度と、 $10 \sim 30\text{nmRz}$ の表面粗さが得られた。

しかし、従来のダイヤモンドホイールによる研削加工では、以下の問題点を有する。

- (i) 機上での砥石のツルイーグ(成形)・ドレッシング(目立て)が不可欠で、非加工時間が多い。
- (ii) 工具摩耗などのために工作物の加工精度に限界が生じ、加工形状が安定しない。
- (iii) また、それに伴う複雑な補正加工プロセスが不可欠であり、加工形状精度の安定化が重要な課題。
- (iv) 微細な形状や構造的な形状に対して、鈍な形状の砥石では加工である。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、断続切削を実現できる「マイクロフライス工具」による切削に着目し、レーザ加工を応用して単結晶ダイヤモンド製のマイクロフライス工具を創成することを提案した。硬質脆性材料であるセラミックスに対して、耐摩耗特性が優れ、超精密金型などの加工形状精度と加工表面粗さが安定し優れた、断続切削を行うことのできる工具を開発することが最終目的である。また、研削加工や旋削加工では実現できなかったが、セラミックス材に微細で構造的な形状を超精密に創成できる切削技術を解明した。

そのため、本研究提案書により、以下について明らかにする。

- (1) 単結晶ダイヤモンドの結晶方位によるレーザ加工の熱加工速度や表面粗さを明らかにする。
- (2) 一定時間、レーザビームを単結晶ダイヤモンドに照射すると、レーザビームのエネルギー密度分布により凹面形状に加工される。これは研磨加工における「単一加工痕」に相当し、この形状が最も良好な表面粗さが得られるレーザ照射条件を解明する。
- (3) この単結晶ダイヤモンド上の単一加工痕の分布形状から、デコンボリューション理論によりレーザ走査軌跡と速度分布を計算する理論を明らかにし、レーザの3次元軌跡を逆

算する方法を確立する。

(4) コンピュータ制御の4軸(X, Y, Z, C)制御の超精密加工機上に、上記レーザーユニットを搭載し、滞留時間制御レーザー加工システムを構築し、0.5~5mm程度の単結晶ダイヤモンドの形状誤差分布を最小にするための形状修正手法、工具軌跡条件を明らかにする。

(5) ダイヤモンドバイトによる旋削とは異なり、ダイヤモンドの回転工具による断続切削の効果により、セラミックスの超精密切削が可能となるのか。ダイヤモンド工具の先端における温度が、断続切削の場合、連続切削に比べ、温度が減少し、それに伴い、ダイヤモンドの摩耗がどれだけ抑制されるかを定量的に明らかにする。

(6) 単結晶ダイヤモンドの結晶方位による硬度、へき開性、耐摩耗性を考慮し、工具形状、方位を決定する方法を構築する。

上述のように本提案の単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具によるセラミックスの切削加工では、学術的特長を有し、セラミックスの超精密・微細加工に対して、以下の結果と効果が期待できる。

本提案の回転する多刃工具による切削(フライス加工)では、断続切削であるため工具の加熱期間が短く、クーラントによる冷却期間が長いので、工具温度が旋削加工のように上がらない。

その結果、従来の旋削におけるRバイトほど工具摩耗が大きくなり、工具摩耗が飛躍的に抑制でき、耐摩耗性が飛躍的に向上する。従来砥石に比べて1/100~1/10000の摩耗抑制が期待できる。

回転工具は刃先の輪郭度精度の影響を受けず真円として扱え、非球面形状の加工精度に高周波の形状誤差(うねり)が転写されない。計測補正加工無しで0.1 μmP-V以下の形状精度が期待できる。

多刃工具であるため実切り込み量は見かけの切込量より十分に小さくなり、硬質脆性材

料でも延性モードの切削が実現しやすい。表面粗さ10nmRz(2nmRa)が切削加工のみで期待できる。

高脆材料であるセラミックスの延性モード切削のメカニズムを明らかにできる。

以上のような結果が期待でき、デジタルデバイス、電子デバイス用の素子のガラス化、マイクロ(微小)化、高精度化が可能になると期待される。

### 3. 研究の方法

単結晶ダイヤモンド工具によるセラミックスの断続切削の効果を実証し、マイクロガラスレンズ成形用セラミック型の超精密切削加工を実現するため、(1) レーザビーム走査装置の設計・試作、(2) レーザビームによる単結晶ダイヤモンドの加工特性の評価、(3) 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の試作、(4) 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の摩耗特性評価、(5) 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具による非球面加工性の評価を行い、微小なマイクロガラス光学部品の微細化、微小化、超精密化を実現するための切削技術の確立、セラミックスの延性モード切削メカニズムの解明を行った。(平成25年度)

#### 1. レーザビーム走査装置の設計・試作

パルス・ファイバーレーザー(に集光光学系を付加したレーザー走査システムの仕様を策定する。詳細な光学設計は光学メーカーに委託する。次に、これらの設計・試作したパルス・ファイバーレーザーとレーザー集光光学系を、3軸制御の位置決め装置(同時3軸制御)(既存のNC駆動装置)に搭載し、レーザービームスキャン装置を試作した。

#### 2. レーザビームによる単結晶ダイヤモンドの加工特性の評価

構築したレーザービーム走査装置を用い、単結晶ダイヤモンドに対する基礎的な加工特性

を評価した。

(1)一定時間、レーザービームを単結晶ダイヤモンドに照射すると、レーザービームのエネルギー密度分布により凹面形状に加工される。これは研磨加工における「単一加工痕」に相当し、この形状が最も良好な粗さ分布が得られるレーザー照射条件を解明した。

(2) この単結晶ダイヤモンド上の単一加工痕の分布形状から、デコンポリューション理論によりレーザー走査軌跡と速度分布を計算する理論を明らかにし、レーザーの3次元軌跡を逆算する方法を確立した。

(3) 滞留時間制御レーザー加工システムを構築し、0.5~5mm程度の単結晶ダイヤモンドの形状誤差分布を最小にするための形状修正手法、レーザー走査条件を明らかにした。

(平成26年度)

### 3. 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の試作

(1) 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の形状を設計し、CAMデータを作成し、マイクロ工具を試作した。工具は超硬のシャンクにロウ付けしてから、シャンクの外周を基準にレーザー加工した。

(2) 単結晶ダイヤモンドの結晶方位による硬度、へき開性、耐摩耗性を考慮し、工具形状、方位を決定する方法を構築した。

(3) 摩耗特性を比較するため、図のように先端がシャープなものとアール加工をしたものを試作した。

### 4. 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の摩耗特性評価

単結晶ダイヤモンドの結晶方位、刃先のエッジのアールなど工具の仕様を変化させ、摩耗特性を評価する。試作した単結晶ダイヤモンド工具を超高速空気静圧スピンドルに取り付け、平面形状のセラミックス（超硬合金、炭化珪素）を切削加工した。

(1) 摩耗の評価法：工具をスピンドルに取り

付けた直後と、所定の切込回数毎に、カーボン板をダミー材としてプランジカットし、その形状を非接触形状測定装置NH3SP(三鷹光器(株)製)により計測し、そのデジタルデータからPCにて摩耗量を計算した。(被削材の除去体積)/(ダイヤモンドの摩耗体積)<研削における研削比に相当>により評価した。

(2) ダイヤモンドの各結晶方位に対するセラミックスの耐摩耗特性を評価し、データベース化した。

(3) 耐摩耗性を考慮し、最適な工具形状や結晶方位を明らかにした。

(平成27年度)

### 5. 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具による非球面加工性の評価

最も優れた方位の工具を用いて、非球面形状の超硬合金、SiC金型を超精密切削し、表面粗さ、形状精度、摩耗量の変化を評価した。切削加工実験装置としては同時4軸(X,Y,Z,C)超精密加工装置ULG100DSH3(位置決め分解能1nm)を、評価はZYGO社製表面粗さ計NewView6200、Panasonic製形状測定器UA3P、三鷹光器(株)製形状測定器NH3SPを用いて行った。

### 4. 研究成果

以上のように超硬合金などのセラミックスを超精密切削するために、図1に示すようにレーザー走査により単結晶ダイヤモンドに微細加工して、図2に示すようなマイクロ回転工具を作製した。

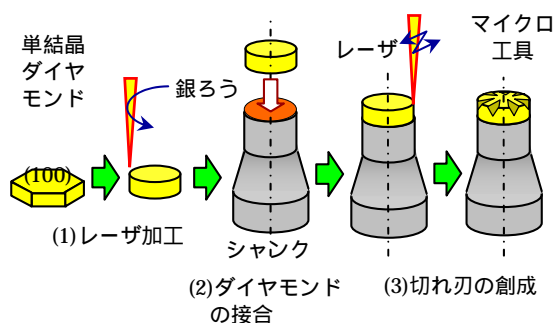
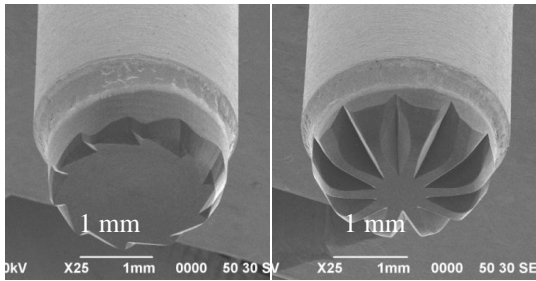


図1 工具の創成プロセス



(a)先端が鋭利な工具 (b)先端がアールの工具 (先端 R=0mm) (R=0.5mm)

図2 レーザ加工で試作した単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具

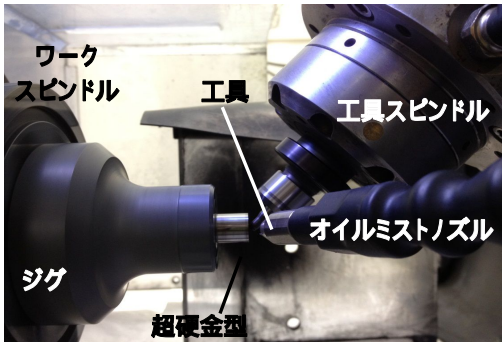
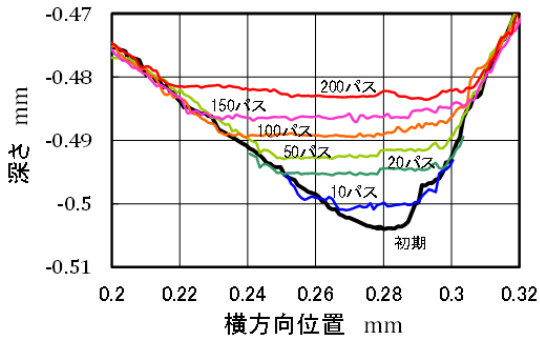
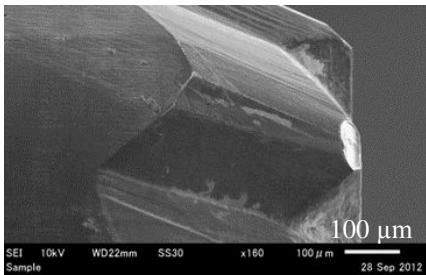


図3 超精密切削実験の様子



(a)工具刃先の摩耗の変化



(b)SEM 写真

図4 工具摩耗の形態

次に図3に示すようにセラミックスの切削基礎実験(工具摩耗, 切りくずの観察)を行い, 最後に実際の非球面金型の切削を行い, その能力を評価した. その結果以下のことが明らかとなった.

(1) 工具として先端が尖った工具(図2(a))とRがついた工具(図2(b))の2種類の工具を用い, 3mmの非球面金型を切削し, 形状精度を表面粗さの変化を評価した. 刃先先端は図4に示すように摩滅型の摩耗形態を示す.

(2) 単結晶ダイヤモンドにおける工具の摩耗量は図5のようであった. この値は, PCD(多結晶ダイヤモンド)の約1/10以下, レジンボンドダイヤモンド砥石の1/100以下と, 本工具の耐摩耗性の高さが明らかとなった.

(3) 超硬後金製の非球面形状金型の切削実験を20回行った結果, 形状精度は図6に示すように0.1-0.2 $\mu\text{mP-V}$ と非常に高精度な値を維持する.

(4) 同様に切削実験を20回行った時の表面粗さの変化は図7に示すように, 10-30nmRzと非常に高精度な値を維持する.

(5) また, 刃先が丸いほど表面粗さは良好であることが明らかとなった. 刃先が尖っている場合, 工作物を引っかく角度が鋭角となり票目なら差が悪化すると考えられる.

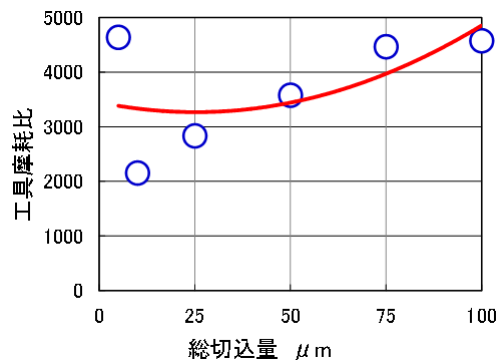


図5 単結晶ダイヤモンドの工具摩耗量

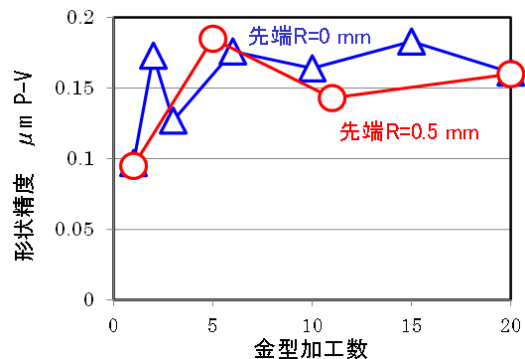


図6 形状精度の変化

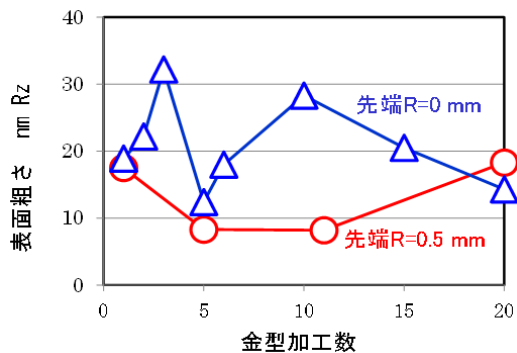


図7 表面粗さの変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

鈴木浩文：超精密マイクロ微細加工（構造的表面の創成），機械と工具，5，11（2015）p.8-12，ISSN0387-1053. 【査読無】

鈴木浩文：高硬度金型材料における切削加工技術，型技術，30，10（2015）p.26-29，ISSN0912-5582. 【査読無】

鈴木浩文：超精密マイクロ微細切削用ダイヤモンド製マイクロフライス工具，機械技術，63，9（2015）p.23-27，ISSN0451-9396. 【査読無】

H. Suzuki, M. Okada, K. Okada, Y. Ito: Precision Cutting of Ceramics with Milling Tool of Single Crystalline Diamond, International Journal of Automation Technology, 9, 1, (2015) p.26-32, ISSN 1881-7629. 【査読有】

鈴木浩文：単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具による超硬合金の超精密切削，砥粒加工学会誌，59，8（2015）p.433-436，ISSN0912-0289. 【査読無】

鈴木浩文：レーザにより創成したダイヤモンド製マイクロ工具を用いたセラミックの超精密切削，レーザ加工学会誌，22，1（2015）p.8-12，ISSN1881-6797. 【査読無】

鈴木浩文：単結晶ダイヤモンド工具による超硬合金製金型の超精密切削，光技術コンタクト，52，8（2014）p.3-8，ISSN0913-7289.

【査読無】

鈴木浩文：単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の開発と超硬合金の超精密切削，

機械技術，62，1（2014）p.22-25，ISSN0451-9396.

【査読無】

H. Suzuki, M. Okada, S. Matsui, Y. Yamagata: Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, Annals of the CIRP, 62, 1(2013) p.59-62, ISSN0007-8506. 【査読有】

鈴木浩文：微細加工へのニーズと対応技術，機械技術，3，8（2013）p.13-16，ISSN0387-1053. 【査読無】

鈴木浩文，岡田 睦：セラミックスなど硬脆材料の超精密・微細加工技術，機械技術，61，7（2013）p.17-22，ISSN0451-9396. 【査読無】

〔学会発表〕(計2件)

鈴木浩文，岡田 睦，加藤英治，山田将博：Ti合金の微細切削（工具摩耗の評価），日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集（2015.9.14，北海道大学・北海道札幌市），S1330101.

鈴木浩文，中野恵太，岡田 睦，岡田浩一，伊藤洋介，三浦太久真：マイクロフライス工具による超硬合金の超精密切削（第3報）- 工具摩耗の評価 -，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2014.3.18，東京大学・東京都文京区），p.501-502.

〔図書〕(計1件)

奥山繁樹，宇根篤鴨，由井明紀，鈴木浩文：機械加工学の基礎，コロナ社（2013），229.

〔その他〕

ホームページ等：

<http://www.chubu.ac.jp/about/faculty/profile/81055a74934afd47b755fc8aca81a2b9e76024dc.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者：鈴木 浩文（SUZUKI, Hirofumi）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20282098

(2) 研究分担者：無

(3) 連携研究者：無